

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
«КОНТАКТНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТЕХНІЧНИХ
ОБ'ЄКТІВ»

З ДИСЦИПЛІНИ
«ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ОБЛАДНАННЯ»

для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
спеціалізацій:

«Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»

«Обладнання переробних і харчових виробництв»

Харків
НТУ «ХПІ»
2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
«КОНТАКТНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТЕХНІЧНИХ
ОБ'ЄКТІВ»

З ДИСЦИПЛІНИ
«ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ОБЛАДНАННЯ»

для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
спеціалізацій:

«Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»

«Обладнання переробних і харчових виробництв»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 30.01.18

Харків
НТУ «ХП»
2018

Методичні вказівки до практичних занять «Контактний метод визначення фізико-механічних параметрів для проектування обладнання технічних об'єктів» з дисципліни «Проектування технічних об'єктів та обладнання» для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізацій: «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів», «Обладнання переробних і харчових виробництв» денної та заочної форм навчання / уклад. В.В. Себко, В.М. Бабенко, А.О. Баранова. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 29 с.

Укладачі:

В.В. Себко,

В.М. Бабенко,

А.О. Баранова

Рецензент В.Ф. Моїсєєв

Кафедра Хімічна техніка та промислова екологія

ВСТУП

Метою практичних занять є вивчення методики розрахунків очікуваних значень сигналів теплового контактного електромагнітного перетворювача (КЕП) зі зразком поширених деталей та з'єднувального обладнання харчових, переробних і хімічних виробництв – немагнітних виробів циліндричної форми.

Дані методичні вказівки містять 15 варіантів завдань і розраховані на одну групу студентів. Ці варіанти допоможуть студентам, користуючись заданими параметрами немагнітних зразків циліндричної форми та геометричними параметрами КЕП, визначити очікувані компоненти сигналів теплового КЕП: електричний опір R (при проходженні повздовж КЕП постійного і змінного струму), сумарну індуктивність L_{Σ} , внутрішню індуктивність L_i , зовнішню індуктивність L_e . Найважливішими результатами розв'язання цієї задачі є знайдені діапазони змінення сигналів електричного опору R та індуктивностей L_{Σ} , L_i , L_e теплового КЕП, які відповідають діапазонам змінення питомого електричного опору p_t та температури t , що надає можливість підвищити якість під час виготовлення деталей хімічного машинобудування, підвищити вірогідність вимірювального контролю фізико-механічних характеристик під час експлуатації виробів машинобудування, надає змогу обрання вимірювальної апаратури схеми включення багатопараметрового теплового КЕП, а також дозволяє знайти раціональні з точки зору досягнення малих похибок вимірювань, режими роботи теплових КЕП з немагнітними виробами, що контролюються. Таким

чином, у харчовій, переробній, будівельній та машинобудівній галузях промисловості важливе значення має діагностика і контроль параметрів немагнітних матеріалів, виробів і конструкцій відповідного обладнання. Так, під час виготовлення обладнання машинобудівної промисловості часто застосовують деталі та конструкції, які виготовлено з немагнітних матеріалів, галузь застосування яких значно розширюється завдяки високим значенням теплопровідності та електропровідності, хімічної стійкості та ін., наприклад, при виготовленні радіаторів, підшипників для хімічної апаратури, теплообмінних апаратів, трубопроводів та судів в кріогенній техніці, електропровідних та електророзподільних пристроїв, з'єднувальних елементів [1–3]. Усе відзначене вище дозволяє покращити якість проектування та конструювання деталей обладнання переробних і харчових виробництв, а також хімічних виробництв, підвищити якість готової продукції, суттєво знизити імовірність браку під час виготовлення продукції машинобудування, призводить до спрощення номенклатури запасних частин, а також дозволяє розробляти та проектувати інформаційні вимірювальні системи на основі використання контактних електромагнітних перетворювачів з циліндричними немагнітними виробами [4–8].

Реалізація контактних електромагнітних методів вимірювального контролю температури дає можливість дослідити розподіл температури за перерізом виробу на кожній глибині проникнення магнітного поля, що є безумовною перевагою цих методів у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю (НК) деталей обладнання машинобудування [4–8]. Таким чином, знання про сучасні багатопараметрові контактні електромагнітні методи та пристрої НК електричних і температурних параметрів циліндричних виробів повинні бути використані під час діагностування вузлів і конструкцій хімічного машинобудування і машинобудування, відпалювання виробів і конструкцій, контролю параметрів елементів і вузлів обладнання машинобудівної галузі, деталей устаткування нафтогазовидобувної промисловості, а також під час

практичних занять з дисципліни «Проектування технічних об'єктів та обладнання».

1. Початкові дані

Дані для розрахунку вибирають за номером завдання, відповідно до порядкового номера прізвища студента у робочому журналі. У таблиці 1 (у відповідних стовпцях) вказано такі показники (зліва-направо): номер завдання; температурний коефіцієнт опору (ТКО) α , x_1 – узагальнений магнітний параметр (робоча точка), намагнічувальний струм I , довжина зразка l_n , питомий електричний опір зразка ρ_l , при $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Також задано: радіус немагнітного зразка циліндричної форми a і початкову температуру $t_1 = 20^\circ\text{C}$.

Таблиця 1 – Початкові дані: магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, досліджуваний діапазон температур t [20 ... 150 $^\circ\text{C}$], напруженість зонduючого виріб магнітного поля $H_0 = 200$ А/м

Номер прізвища студента в журналі	$\alpha \cdot 10^{-3}$, 1/ $^\circ\text{C}$	x_1	I , А	l_n , см	$\rho_l \cdot 10^{-8}$, Ом·м	a , мм	Матеріал виробу
1	0,8	3	0,35	55	75	19	Сталь 12X18H10T
2	3,5	2,0	0,5	2,0	1,58	2	срібло
3	4,23	1,50	0,7	75	2,83	10	алюміній
4	4,29	1,75	0,72	65	2,24	15	мідь М2
5	0,828	1,5	0,3	50	72	17	Сталь 07X16H6
6	4,28	2,54	0,67	42	1,78	7	латунь ЛС – 60
7	0,834	2,86	0,38	50	74	12	Сталь 08X17H5M3
8	4,21	3,52	0,73	70	5,82	10	дюраль
9	4,49	2,82	0,65	6,0	5,48	3	вольфрам
10	4,26	2,34	0,7	35	1,75	9	латунь ЛС – 59

Продовження табл.1

11	3,29	4,16	0,71	50	1,57	7	тантал
12	4,3	2,30	0,66	50	1,72	10	мідь М1
13	0,805	1,90	0,31	62	75	8	Сталь 09Х15Н9Ю
14	0,829	2,20	0,35	60	77	6	Сталь 08Х18Г8Н2Т
15	4,25	1,98	0,6	70	2,23	5	Томпак Л90

2. Схема включення теплового контактного електромагнітного перетворювача (КЕП) для двохпараметрового контролю електричних та температурних характеристик немагнітних циліндричних виробів

Теорія роботи теплового КЕП полягає у такому: при заданій частоті f магнітного поля електричний струм витискується на окреслену глибину проникнення, що, у свою чергу, змінює внутрішній магнітний потік Φ_i і внутрішню індуктивність зразка L_i . При цьому збільшується активна частина електричного опору зразка. Все це призводить до того, що на заданій частоті магнітного поля f одночасно зменшується внутрішня індуктивність L_i і збільшується активний опір R виробу, що контролюється [7].

Оскільки параметри R і L_i циліндричного немагнітного виробу залежать від питомого електричного опору ρ , температури t та геометричних параметрів, тобто радіуса a і довжини l зразка, що контролюється, в цьому випадку буде підходящою система рівнянь, яка пов'язує сигнали КЕП з електричними, геометричними та температурними параметрами досліджуваного немагнітного циліндричного виробу [4–8]:

$$\begin{cases} L_{\text{ин}} = f(\mu_{rt}, \rho_t, a), \\ R_{\text{н}} = f(\mu_{rt}, \rho_t, a), \\ \frac{\rho}{\rho_1} - 1 = \frac{\alpha}{1 + \alpha t_1} (t - t_1). \end{cases} \quad (1)$$

Таким чином, знаючи сигнали КЕП R і L_i , у результаті вимірювань та розв'язання системи (1), можна визначати питомий електричний опір ρ_t , радіус a та температуру зразка t при реалізації багатопараметрових методів. За допомогою третього рівняння системи (1), можна визначити температуру t [9, 10], при якій здійснюється вимірювальний контроль електричних параметрів немагнітних виробів та сигналів теплового КЕП. При цьому циліндричний немагнітний виріб, по якому проходить повздовжній електричний струм і є контактним електромагнітним перетворювачем, тобто КЕП [7]. Суть роботи КЕП полягає у тому, що при використанні відомих схем включення [5, 7] визначають напругу U на виробі, що контролюється, і фазовий кут φ між електричним струмом I і цією ж напругою [7]. Таким чином, пов'язане з варіацією частоти поля змінення магнітного потоку у виробі, у свою чергу, призводить до змінення внутрішньої індуктивності L_i , а також повного електричного опору R немагнітного циліндричного виробу, при цьому R і L_i залежать від питомого електричного опору ρ_t , геометричних параметрів a і l (радіуса, довжини), а також від температури t немагнітного виробу [4–8].

Таким чином, циліндричний немагнітний виріб з повздовжнім струмом у даному випадку і є контактним електромагнітним перетворювачем (КЕП), тобто досліджуваний зразок, що контролюється являє собою одночасно і об'єкт контролю (ОК), і КЕП, оскільки його внутрішня індуктивність і активний опір мають інформацію про питомий, електричний опір ρ_t та температуру t [4–8].

Слід відзначити, що сьогодні особлива увага приділяється термінології, яка використовується при дослідженні моделей: електромагнітний перетворювач (ЕП) \rightarrow об'єкт контролю (ОК). Нижче будуть наведені основні терміни і визначення, які необхідні для вивчення матеріалу дисципліни «Проектування технічних об'єктів та обладнання».

Проектування – це комплекс робіт, який складається зі здійснення та пошуку досліджень, розрахунків і технічної документації з метою отримання

опису, достатнього для створення нового об'єкта або виробу, його реконструкції, модернізації, що відповідає заданим вимогам нормативних документів.

Технічний проект – сукупність документації, яка містить технічні рішення, що дають повне уявлення про обладнання, що проектується, а також всі початкові дані, необхідні для розробки робочої документації на стадії конструювання [1–3].

Технічне завдання – встановлює призначення обладнання, галузь його застосування, характеристику (короткий опис), технічні вимоги, етапи розробки і терміни їх виконання, обґрунтування ефективності застосування, перелік документів, що підлягають до розгляду замовником, особливості приймальних випробувань. *Технічне переоснащення* – комплекс заходів щодо підвищення експлуатаційних властивостей об'єктів невиробничого та виробничого призначення, введених в експлуатацію в установленому порядку шляхом впровадження передової техніки та технології, механізації і автоматизації виробництва, оновлення та заміни застарілого і фізично зношеного устаткування новим, більш продуктивним [1–3].

Технічна пропозиція – сукупність конструкторських документів, які містять у собі обґрунтування доцільності розробки документації стосовно деталей, виробів та конструкцій на основі аналізу технічного завдання, наданого замовником, результатів науково-дослідних робіт, досвіду експлуатації аналогів обраної конструкції та порівнювального оцінювання різних рішень з урахуванням конструктивних та експлуатаційних особливостей деталей, виробів, конструкцій, вузлів, які підлягають розробленню за певний проміжок часу. Технічна пропозиція після узгодження та затвердження є основою для розробки технічного проекту [1–3].

Технічний проект – сукупність конструкторських документів, які містять принципові конструктивні рішення, які надають загальне уявлення щодо конструкції та принципу роботи виробу, а також дані, які визначають

призначення, основні параметри та габаритні розміри виробу, що розробляється [1–3].

Дослідний зразок виробу – виріб, який виготовляється відповідно до нової робочої конструкторською документації для перевірки його відповідності технічному завданню, подальшого необхідного корегування документації та підготовляння технологічного процесу виготовлення основних складових частин виробу (в окремих випадках виготовляють дослідну партію виробів) [1–3].

Виріб установної серії – виріб, виготовлений відповідно до документації уточненої після виготовлення згідно з результатами випробувань дослідного зразка (для контролю його відповідності технічному завданню), перевірки технологічного процесу виготовляння виробу та подальшого обов’язкового корегування документації [1–3].

Виріб серійного виробництва – виріб виготовлений в умовах серійного виробництва на основі серій промислової продукції, які періодично повторюються за єдиною конструкторською документацією. *Виріб масового виробництва* – виріб, який виготовляється безперервно в умовах масового виробництва за єдиною конструкторською документацією [1–3].

Робоча температура t – температура наявного або переробляючого середовища у апараті при нормальному протіканні технологічного процесу [1–9].

Розрахункова температура t_R – температура для визначення фізико-механічних характеристик конструкційного матеріалу та механічних напружень, що допускаються під час досліджень. Розрахункова температура визначається на основі теплових розрахунків або результатів випробувань. При плюсових температурах за розрахункову температуру, наприклад, стінки апарата, приймають найбільше значення температури стінки. При мінусовій температурі стінки елемента (сосуд-посудина або апарата), за розрахункову температуру при визначенні механічних напружень, що допускаються, приймають значення температури $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. У разі неможливості проведення

теплових розрахунків або вимірювань, у тих випадках, коли під час експлуатації температура стінки підвищується до температури середовища, яке стикається із стінкою апарату, – за розрахункову температуру слід приймати найбільшу температуру середовища (значення якої не нижче ніж значення температури $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1–9].

Технічна діагностика – це галузь знань, яка досліджує технічний стан об'єктів діагностування та виявлення технічних станів, розробляє методи їх визначення, а також принципи побудови та організації використання систем діагностування. Технічне діагностування – процес визначення технічного стану об'єкта діагностування з певною точністю. При діагностуванні необхідно розрізняти робочі дії, які виконуються безпосередньо об'єктом при його функціонуванні та тестові дії на об'єкт, які застосовуються тільки для діагностування. *Технічний стан* – сукупність властивостей об'єкта, які змінюються в процесі виробництва або експлуатації і характеризуються у певний момент часу ознаками, встановленими технічною документацією на об'єкт. *Об'єкт технічного діагностування* – це споруда, машина, вузол, деталь, з'єднання, виріб та його складові, частини або заготовки, технічний стан яких підлягає дослідженню. *Об'єкт випробувань* – це продукція, що підлягає випробуванню [1–4]. *Ознака продукції* – якісна або кількісна характеристика будь-яких властивостей або стану продукції. *Ознака, що контролюється*, – характеристика об'єкта, який підлягає контролю. *Обсяг контролю* – це кількість об'єктів і сукупність ознак, встановлених для проведення контролю [1–4].

Система автоматизованого проектування (САПР) – автоматизована система, призначена для автоматизації технологічного процесу проектування виробу, результатом якого є комплект проектно-конструкторської документації, достатньої для виготовлення та подальшої експлуатації об'єкта проектування. САПР реалізується на базі спеціального програмного забезпечення, автоматизованих банків даних, широкого набору периферійних пристроїв [1–4].

Рівень розвитку промисловості на сучасному етапі характеризується не тільки обсягом виробництва та асортиментом нової продукції, а й показниками її якості. У розв'язанні найважливішої проблеми підвищення якості продукції головну роль виконують методи і засоби НК [4].

Неруйнівний контроль (НК) – це процес перевірки, визначення та оцінки показників якості матеріалів, виробів, машин, споруд, з'єднань тощо фізичними методами без порушення їх властивостей і функціональної здатності [4]. Він ґрунтується на фізичних явищах, що виникають під час взаємодії фізичних полів і речовин з матеріалом об'єкта, який підлягає контролю. Аналіз цих явищ дозволяє оцінити показники якості і встановити відповідність виробу або речовини сертифікату і технічним вимогам [4]

Вихрострумний перетворювач (ВП) – прилад, що складається з однієї чи декількох індуктивних обмоток, призначених для збудження залежного від параметрів ОК електромагнітного поля у сигнал перетворювача [4].

Вимірювальний контроль – контроль, який виконується з використанням вимірювальних засобів. *Сигнал, що контролюється*, – сигнал що надходить на вхід засобу контролю та несе інформацію про технічний стан ОК. *Параметр сигналу* – характеристика сигналу, яка відбиває фізичну величину [4].

Контрольований параметр при вихрострумовому контролі – параметр об'єкта, що підлягає контролю шляхом перетворення його в сигнал ВП. *Визначальний показник якості продукції* – показник якості продукції, за яким приймають рішення стосовно оцінки її якості. *Якість виготовлення продукції* – це сукупність характеристик процесу виготовлення продукції, від яких залежить відповідність цього процесу та його результатів певним вимогам. *Вимога* – це загальне положення, яке містить критерії щодо виготовлення продукції, що мають бути враховані [4].

Дані випробувань – значення, які реєструють при випробуваннях характеристик властивостей об'єкта або умов випробування, а також їхніх параметрів, які є вихідними для наступної обробки. *Дійсне значення*

параметра – значення параметра, яке вимірюється тільки із заданою точністю. *Забезпечення якості* – сукупність планових і систематичних заходів, необхідних для виникнення впевненості в тому, що виріб або зразок задовольняють певним вимогам щодо якості [4]. *Зразок для випробувань* – продукція або її частина чи проба, яка безпосередньо підлягає використанню при випробовуваннях. *Контроль* – заходи, які включають до себе проведення вимірювань, випробувань, перевірки однієї або кількох характеристик виробів чи зразка згідно зі встановленими вимогами. *Метод контролю* – правила застосовування певних принципів та засобів контролю. *Метод неруйнівного контролю* – метод контролю, при якому не порушуються властивості матеріалу та здатність об'єктів бути застосованими за початковим призначенням. *Контролепридатність* – властивість виробу або зразка, яка характеризує його придатність до проведення контролю заданими прийомами чи засобами. *Гранично допустиме значення параметра* – найбільше або найменше значення параметра, яке може мати діючий виріб під час експлуатації. *Гранично можливе значення параметра* – найбільше або найменше значення параметра, яке може мати недіючий виріб [4].

Зовнішня індуктивність L_e – індуктивність, яка залежить тільки від геометричних розмірів об'єктів, що контролюються, та пов'язана із зовнішнім магнітним потоком, який проходить поза ОК [5]. *Внутрішня індуктивність L_i* – індуктивність, яка обумовлена проходженням магнітного потоку безпосередньо у ОК та яка залежить від матеріалу виробу [5].

Безконтактні електромагнітні перетворювачі мають ряд суттєвих недоліків, серед яких виділяються передусім велика довжина зразка, а також складність конструкції електромагнітного перетворювача та схеми його включення. У цьому плані, контактний електромагнітний перетворювач вільний від вказаних недоліків [7]. З урахуванням результатів робіт [4–8], на рис. 1 наведено схему включення КЕП з металевим немагнітним зразком, що контролюється.

Слід відзначити, що включення КЕП в мостову схему, яка працює на

змінному струмі (наприклад, при використанні мостів R5084, R5085), має цілу низку переваг, а саме: досить висока точність, автоматичне врівноважування, цифровий відлік. Таким чином, у схемі на рис.1, КЕП з повздовжнім струмом, представляє собою одночасно і зразок й контактний електромагнітний перетворювач [7].

Застосування контактних електромагнітних перетворювачів надає змогу для сумісного вимірювального контролю електричних і температурних параметрів зразків обладнання хімічного машинобудування в процесі виготовлення та експлуатації [8].

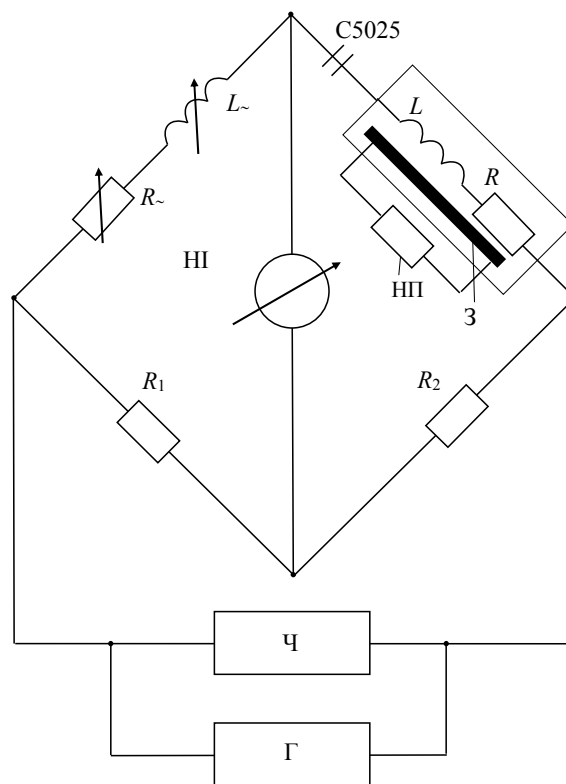


Рисунок 1 – Схема включення КЕП з немагнітним металевим зразком

Схема на рис.1 включає: КЕП, який показано на схемі у вигляді послідовно увімкнутого опору R та індуктивності L , нуль-індикатор НІ, магазини змінних опорів та індуктивностей $R\sim$ і $L\sim$, опори R_1 і R_2 , генератор Γ , частотомір Ч , компенсуючу ємність C5025, зразок 3, що контролюється, нагрівальний пристрій НП (для нагрівання 3 в процесі контролю електричних параметрів). Призначення пристроїв, які містить вимірювальна схема,

полягає у тому, що металевий зразок має електричний опір R та сумарну індуктивність L_{Σ} , яка включає внутрішню і зовнішню індуктивності, тобто L_i та L_e , всі ці компоненти сигналів КЕП залежать від фізико-механічних параметрів зразка [5–7]. У суміжне зі зразком плече моста увімкнуті магазини змінних опорів та індуктивностей, тобто R_{\sim} і L_{\sim} . Задля досягнення рівноваги мосту, яка фіксується нуль-індикатором НІ, необхідно застосування двох опорів R_1 і R_2 . Міст живиться від генератора Г синусоїдальних сигналів. Компенсуючу ємність С5025 призначено для компенсації зовнішньої індуктивності L_e . Частота живильної напруги контролюється частотоміром Ч. Також передбачено гріючий пристрій – НП, для змінення температури зразка в процесі контролю питомого електричного опору p , який на даний час є корелюючим параметром з температурою t [6, 8].

3. Визначення компонентів сигналів КЕП зі зразком контрольованого обладнання

Під час виконання розрахункового завдання студентам необхідно розв'язати пряму задачу – визначити компоненти сигналів теплового КЕП, які залежать від електричних та температурних параметрів зразка циліндричної форми. Таким чином, пряма задача для КЕП полягає у такому: знаючи геометричні параметри КЕП (довжину l_n і радіус a), знаючи температурний коефіцієнт опору матеріалу зразка α , знаючи залежність питомого електричного опору p заданого матеріалу зразка від температури t (яка має лінійний характер у досліджуваному діапазоні температур від 20 до 150 °С), – необхідно визначити очікувані значення компонентів сигналів КЕП: напругу U , фазовий кут зсуву φ між струмом I та напругою U , опір змінному струму R_{it} , внутрішню індуктивність L_{it} та сумарну індуктивність $L_{\Sigma t}$ (індекс t свідчить про те, що дана характеристика залежить від температури t).

Найважливішим значенням розв'язку прямої задачі є знайдені діапазони

варіювання опорів та індуктивностей КЕП, які відповідають границям змінення питомого електричного опору ρ_t і температури t немагнітних циліндричних виробів, що надає можливість підбору вимірювальної апаратури схеми включення КЕП, а також дозволяє знайти раціональні з точки зору досягнення малих похибок вимірювань та чутливостей режиму роботи теплових КЕП. Алгоритм визначення компонентів сигналів КЕП полягає у такому:

1. Користуючись табл. 1 (таблицею вихідних даних), обираємо робочу точку x_1 відповідно до варіанта завдання.

2. Розрахуємо частоту магнітного поля f_1 при відомих значеннях a_3 , ρ_1 і x_1 , за формулою:

$$f_1 = \frac{x_1^2 \rho_1}{2\pi a^2 \mu_0}. \quad (2)$$

3. Визначимо опір зразка постійному струму R_0 , з виразу:

$$R_0 = \rho_1 \frac{l}{S} \quad (3)$$

де S – площа поперечного перерізу зразка, що контролюється ($S = \pi a^2$).

4. Знаходимо індуктивність зразка постійного струму L_0 , за формулою:

$$L_0 = \frac{l n \mu_0}{8\pi}. \quad (4)$$

5. Задаючись дискретними значеннями температур у діапазоні від 20 до 150 °С, через кожні 10 °С визначаємо питомий електричний опір ρ_t для кожного дискретного значення температури за формулою [9]:

$$\rho_t = \rho_1 + \frac{\rho_1 \alpha}{1 + \alpha t_1} (t - t_1). \quad (5)$$

6. Знаючи питомий електричний опір ρ_t , знаходимо узагальнений магнітний параметр x_t для кожної досліджуваної температурної точки:

$$x_t = a \sqrt{\frac{2\pi\mu_0 f_1}{\rho_t}}. \quad (6)$$

7. Для визначення нормованого електричного опору R_{nt} і нормованої внутрішньої індуктивності L_{int} , необхідно скористатися залежностями $R_{nt} = f(x_t)$ та $L_{int} = f(x_t)$, які наведено у таблиці А1 (додаток А) [7]. Слід відзначити, що при попаданні x_t між двома близькими значеннями, необхідно здійснювати лінійну інтерполяцію за формулами:

$$R_{nt} = \frac{(x_t - x_n)}{(x_k - x_n)} (R_{нк} - R_{нп}), \quad (7)$$

де x_t – значення узагальненого параметра, яке знайдено за формулою (6); x_k – кінцеве значення з двох близьких значень, між якими знаходиться x_t ; x_n – попереднє значення з двох близьких значень, між якими знаходиться x_t ; $R_{нп}$ – значення параметра R_{nt} , яке відповідає x_n ; $R_{нк}$ – значення параметра R_{nt} , яке відповідає x_k . Та за формулою визначаємо:

$$L_{int} = \frac{(x_t - x_n)}{(x_k - x_n)} (L_{інп} - L_{інк}) + L_{інк}, \quad (8)$$

де $L_{інп}$ – значення параметра L_{int} , яке є відповідним x_n ; $L_{інк}$ – значення параметра L_{int} , яке відповідає x_k ;

8. Визначимо активну частину опору зразка R_{it} :

$$R_{it} = R_{int} R_0. \quad (9)$$

9. Знаходимо внутрішню індуктивність L_{it} на змінному струмі:

$$L_{it} = L_{int} L_0. \quad (10)$$

10. Визначимо зовнішню індуктивність L_e , за формулою [5]:

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right). \quad (11)$$

11. Знаходимо сумарну індуктивність $L_{\Sigma t}$ КЕП за допомогою формули:

$$L_{\Sigma t} = L_{it} + L_e. \quad (12)$$

12. Визначимо фазовий кут зсуву φ_t між струмом I та напругою U :

$$\operatorname{tg} \varphi_t = \frac{L_{\Sigma t} \omega_t}{R_{it}} \quad (13)$$

13. Знаючи струм I , знаходимо напругу U на кінцях зразка:

$$U = \frac{R_{it} I}{\cos \varphi_t}. \quad (14)$$

14. Результати розрахунків очікуваних значень компонентів сигналів теплового КЕП зведемо до табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків компонентів сигналів КЕП з контрольованим металевим немагнітним зразком циліндричної форми

$$\mu_r = 1; \quad f_1 = \quad [\text{Гц}]; \quad S = \quad [\text{м}^2]; \quad R_0 = \quad [\text{Ом}]; \quad L_0 = \quad [\text{Гн}]; \quad L_e = \quad [\text{Гн}]$$

t , °C	$\rho_t \cdot 10^{-8}$, Ом·м	x_t	R_{it}	L_{it}	$R_{it} \cdot 10^{-4}$, Ом	$L_{it} \cdot 10^{-6}$, Гн	$L_{\Sigma t} \cdot 10^{-6}$, Гн	φ_t , град	U , мВ
20									
30									
40									
50									
60									
70									
80									
90									
100									
110									
120									
130									
140									
150									

4. Чисельний приклад визначення компонентів сигналів теплового КЕП з немагнітним циліндричним зразком (для температурної точки ($t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$))

Варіант 1

1. Використовуючи таблицю вхідних даних (див. таблицю 1), вибираємо робочу точку:

$$x = x_1 = 3.$$

2. Розрахуємо частоту f_1 (при $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), за формулою (1)

$$f_1 = \frac{x_1^2 \rho_1}{2\pi a^2 \mu_0} = \frac{3^2 \cdot 7,7 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} (19 \cdot 10^{-3})^2} = 2370 \text{ Гц.}$$

3. Визначаємо чисельне значення електричного опору R_0 зразка під час проходження постійного струму

$$R_0 = \rho_1 \frac{l_n}{S} = 7,5 \cdot 10^{-7} \frac{0,55}{3,14 \cdot (19 \cdot 10^{-3})^2} = 3,639 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

4. Розраховуємо індуктивність зразка постійному струму L_0 :

$$L_0 = \frac{\mu_0 l_n}{8\pi} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,55}{8 \cdot 3,14} = 0,0275 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

5. Визначаємо питомий електричний опір ρ_t , для $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\rho_{70\text{ }^{\circ}\text{C}} = \rho_1 + \frac{\rho_1 \alpha}{1 + \alpha t_1} (t - t_1) = 7,5 \cdot 10^{-7} + \frac{7,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,8 \cdot 10^{-2}}{1 + 0,8 \cdot 10^{-2} \cdot 20} (30 - 20) = 7,559 \cdot 10^{-7}$$

Ом·м.

6. Знаючи ρ_t , знаходимо узагальнений параметр x_t , для $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$x_{30\text{ }^{\circ}\text{C}} = a \sqrt{\frac{2\pi \mu_0 f_1}{\rho_{30\text{ }^{\circ}\text{C}}}} = 19 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 2370}{7,559 \cdot 10^{-7}}} = 2,988.$$

7. Для визначення нормованого електричного опору R_{nt} і нормованої внутрішньої індуктивності L_{int} необхідно скористатися залежностями $R_{nt} = f(x_t)$ та $L_{int} = f(x_t)$, які наведено у таблиці А1 (додаток А). Слід визначити, що при потраплянні x_t між двома близькими значеннями, необхідно здійснювати лінійну інтерполяцію:

$$R_{\text{inf}} = \frac{(x_k - x_n)}{x_k - x_n} \cdot (R_{\text{HK}} - R_{\text{HH}}) + R_{\text{HH}} = \frac{2,988 - 2,98}{3,00 - 2,98} \cdot (1,31841804 - 1,31197747) + 1,31197747 = 1,3146;$$

$$L_{\text{inf}} = \frac{(x_k - x_n)}{(x_k - x_n)} (L_{\text{HH}} - L_{\text{HK}}) + L_{\text{HK}} = \frac{3,00 - 2,988}{3,00 - 2,98} (0,84804631 - 0,84501451) = 0,8468.$$

8. Визначаємо активну частину опору немагнітного циліндричного зразка

$$R_{\text{if}} = R_{\text{inf}} R_0 = 1,31842 \cdot 3,639 \cdot 10^{-4} = 4,7837 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

9. Розраховуємо внутрішню індуктивність зразка L_{if}

$$L_{\text{if}} = \frac{L_{\text{inf}} \mu_0 l_{\text{п}}}{8\pi} = \frac{0,84683 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,55}{8 \cdot 3,14} = 0,0233 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

10. Знаходимо зовнішню індуктивність L_e

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right) = \frac{12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 0,55}{6,28} \left(\ln \frac{2 \cdot 0,55}{19 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) = 0,3366 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

11. Розраховуємо сумарну індуктивність L_{Σ} КЕП:

$$L_{\Sigma f} = L_{\text{if}} + L_e = 0,02324 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} + 0,33665 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 0,3599 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

12. Визначаємо фазовий кут зсуву φ_l між струмом I та напругою U :

$$\text{tg } \varphi_f = \frac{L_{\Sigma f} \omega_f}{R_{\text{if}}} = \frac{0,35989 \cdot 10^{-6} \cdot 6,28 \cdot 2370}{4,798 \cdot 10^{-4}} = 11,19^\circ;$$

$$\varphi_l = \text{arctg} 11,16435 = 84,89^\circ.$$

13. Знаходимо напругу U

$$U = \frac{R_{\text{if}} I}{\cos \varphi_f} = \frac{4,79779 \cdot 10^{-4} \cdot 0,35}{0,47079} = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

14. Результати розрахунків було зведено у таблицю 2.

Далі наведено фрагмент таблиці №2 для наведеного вище прикладу, розрахунку очікуваних значень сигналів електромагнітного перетворювача зі зразком деталі обладнання циліндричної форми, згідно зі схемою досліджень.

Фрагмент таблиці 2 – Результати розрахунків компонентів сигналів КЕП зі сталевим контрольованим зразком (матеріал сталь 12Х18Н10Т) циліндричної форми

$$\mu_r = 1; f_1 = 2370 \text{ [Гц]}; S = 0,059 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]}; R_0 = 3,639 \cdot 10^{-4} \text{ [Ом]};$$

$$L_0 = 0,0275 \cdot 10^{-6} \text{ [Гн]}; L_e = 0,33665 \cdot 10^{-6} \text{ [Гн]}$$

t , °C	$\rho_t \cdot 10^{-8}$, Ом·м	x_t	R_{nt}	L_{int}	$R_{it} \cdot 10^{-4}$, Ом	$L_{it} \cdot 10^{-6}$, Гн	$L_{\Sigma} 10^{-6}$, Гн	φ_t , град	U , мВ
30	75,59	2,988	1,3146	0,8468	4,7837	0,0233	0,3599	84,89	0,36

5. Оформлення звіту контрольної роботи

Загальний обсяг 10–12 стор. Текст має бути написано розбірливим почерком або креслярським шрифтом згідно з СТП НТУ «ХПІ»: з висотою букв та цифр не менше ніж 2,5 мм на одній стороні аркуша стандартного формату 297×210 мм, формули та кресельні знаки необхідно виконувати кресельним шрифтом. Графічний матеріал потрібно виконувати простим олівцем відповідно до стандартів ЕСКД на умовні графічні зображення елементів схем.

Робота повинна містити основні співвідношення, які використовуються при розрахунках компонентів сигналів КЕП з немагнітним циліндричним виробом: напруги U , фазового кута зсуву φ між струмом I та напругою U , опору змінного струму R_{it} , внутрішньої індуктивності L_{it} та сумарної індуктивності L_{Σ} , а також вирази, які використовуються при визначенні параметрів зразків циліндричної форми обладнання машинобудування, що контролюються, і таблицю розрахунків компонентів сигналів КЕП.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні стадії розробки виробів обладнання машинобудування.
2. Наведіть визначення терміна «технічне завдання».
3. Назвіть вимоги до технічного завдання.
4. Види конструкторських документів.
5. Яка послідовність розробки технологічної схеми?
6. У чому різниця між попередньою та остаточною технологічними схемами?
7. Назвіть різновиди трубопровідної арматури.
8. Що таке екологічне прогнозування?
9. Які екологічні фактори необхідно враховувати під час проектування обладнання?
10. Дайте визначення поняття САПР.
11. У чому полягає необхідність контролю деталей обладнання хімічного машинобудування?
12. Дайте визначення поняття «метод контролю».
13. Назвіть види неруйнівного контролю (НК) обладнання машинобудування.
14. Дайте визначення поняття «Електромагнітний контроль деталей обладнання».
15. Класифікація методів електромагнітного контролю. Переваги контактних електромагнітних методів та перетворювачів.
16. Функції перетворення, за допомогою яких здійснюється реалізація контактних електромагнітних методів. У чому полягає відмінність між функціями перетворення теплових КЕП з циліндричним і трубчастим виробом?
17. У чому сутність роботи контактного електромагнітного перетворювача (КЕП)?
18. Робота схеми КЕП зі зразком, що контролюється.

Список літератури

1. Беркман Б.Е. Основы технологического проектирования. Учебное пособие // Б.Е.Беркман. – М.: Химия, 1970. – 320 с.
2. Викторов М.М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. Учебник //М.М. Викторов – Л.: Химия, 1977. –360 с.
3. Криворот А.С. Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности. Учебник //А.С. Криворот. – М.: Машиностроение, 1967. – 376 с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
5. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: справочник / П.Л.Калантаров Л.А. Цейтлин – Л.: Энергия, 1986. – 415 с.
6. Себко В. В. Контроль температуры и её распределение внутри проводящих изделий /В. В. Себко, В. Б. Большаков, В. Н. Гугнин // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Материалы конференции – Харьков, 1996. – С. 196.
7. Себко В.П. Расчет магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий по сигналам контактного электромагнитного преобразователя /В.П. Себко, С.Г. Львов // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 1998. – Вип. 2, Т.2. – С. 171–174.
8. Себко В. В. Определение электромагнитных параметров проводящих цилиндрических изделий контактным методом с учётом текущей температуры /В. В. Себко // Український метрологічний журнал. – Харків, 2006. – Вип. 3. – С. 24-27.
9. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
10. Справочник металлиста / под ред. А.М. Малова. – М.: Машиностроение. – Т. 2. – 1977. – 748 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Залежності відношення нормованих електричних опорів і індуктивностей немагнітних металевих зразків від узагальненого параметра

$$x_t, R_{нт} = f(x_t) \text{ та } L_{нт} = f(x_t)$$

x_t	$R_{нт}$	$L_{нт}$
0,02	1,00000000	1,00000000
0,04	1,00000001	0,99999999
0,06	1,00000007	0,99999996
0,08	1,00000022	0,99999989
0,10	1,00000054	0,99999973
0,12	1,00000112	0,99999944
0,14	1,00000206	0,99999897
0,16	1,00000350	0,99999825
0,18	1,00000559	0,99999721
0,20	1,00000850	0,99999575
0,22	1,00001242	0,99999379
0,24	1,00001757	0,99999122
0,30	1,00004275	0,99997862
0,32	1,00005530	0,99997235
0,34	1,00007042	0,99996479
0,36	1,00008845	0,99995578
0,38	1,00010974	0,99994513
0,40	1,00013466	0,99993267
0,42	1,00016360	0,99991820
0,44	1,00019696	0,99990152
0,46	1,00023519	0,99988241
0,48	1,00027873	0,99986064
0,50	1,00032805	0,99983598
0,52	1,00038363	0,99980819
0,54	1,00044600	0,99977701
0,56	1,00051567	0,99974217
0,58	1,00059319	0,99970341
0,60	1,00067914	0,99966044
0,62	1,00077410	0,99961297
0,64	1,00087867	0,99956069
0,66	1,00099348	0,99950329
0,68	1,00111918	0,99944045
0,70	1,00125642	0,99937184
0,72	1,00140589	0,99929712

x_t	$R_{нт}$	$L_{нт}$
0,74	1,00156829	0,99921594
0,75	1,00156829	0,99921594
0,76	1,00174434	0,99912793
0,78	1,00193477	0,99903274
0,80	1,00214035	0,99892998
0,82	1,00236184	0,99881927
0,84	1,00260003	0,99870021
0,86	1,00285574	0,99857240
0,88	1,00312978	0,99843544
0,90	1,00342300	0,99828889
0,92	1,00373626	0,99813233
0,94	1,00407044	0,99796533
0,96	1,00442642	0,99778745
0,98	1,00480510	0,99759822
1,00	1,00520742	0,99739720
1,02	1,00563431	0,99718391
1,04	1,00608671	0,99695788
1,06	1,00656560	0,99671864
1,08	1,00707195	0,99646570
1,10	1,00760674	0,99619857
1,12	1,00817099	0,99591674
1,14	1,00876571	0,99561972
1,16	1,00939193	0,99530699
1,18	1,01005068	0,99497805
1,20	1,01074300	0,99463237
1,22	1,01146996	0,99426944
1,24	1,01223262	0,99388872
1,26	1,01303204	0,99348969
1,28	1,01386933	0,99307181
1,30	1,01474554	0,99263455
1,32	1,01566179	0,99217736
1,34	1,01661917	0,99169972
1,36	1,01761877	0,99120108

Продовження додатка А

x_t	R_{ht}	L_{iht}
1,38	1,01866170	0,99068090
1,40	1,01974907	0,99013864
1,42	1,02088198	0,98957374
1,46	1,02328886	0,98837393
1,48	1,02456504	0,98773792
1,50	1,02589118	0,98707714
1,52	1,02726838	0,98639105
1,54	1,02869773	0,98567911
1,56	1,03018031	0,98494081
1,58	1,03171721	0,98417563
1,60	1,03330950	0,98338305
1,62	1,03495824	0,98256257
1,64	1,03666446	0,98171367
1,66	1,03842922	0,98083588
1,68	1,04025354	0,97992870
1,70	1,04213842	0,97899165
1,72	1,04408486	0,97802427
1,74	1,04609383	0,97702610
1,76	1,04816629	0,97599669
1,78	1,05030317	0,97493561
1,80	1,05250540	0,97384244
1,82	1,05710945	0,97271676
1,84	1,05710945	0,97155818
1,86	1,05951297	0,97036632
1,88	1,06198527	0,96914081
1,90	1,06452714	0,96788129
1,92	1,06713932	0,96658744
1,94	1,06982257	0,96525893
1,96	1,07257758	0,96389547
1,98	1,07540501	0,96249677
2,00	1,07830551	0,96106257
2,02	1,08127968	0,95959262
2,04	1,08432807	0,95808670
2,06	1,08745123	0,95654461
2,08	1,09064963	0,95496617
2,10	1,09392374	0,95335121
2,12	1,09727396	0,95169961
2,14	1,10070066	0,95001123
2,16	1,10420418	0,94828600
x_t	R_{ht}	L_{iht}

2,18	1,10778479	0,94652384
2,20	1,11144275	0,94472471
2,22	1,11517826	0,94288858
2,24	1,11899147	0,94101547
2,26	1,12288249	0,93910541
2,28	1,12685138	0,93715844
2,30	1,13089818	0,93517465
2,32	1,13502284	0,93315415
2,34	1,13922530	0,93109706
2,36	1,14350544	0,92900355
2,38	1,14786309	0,92687379
2,40	1,15229803	0,92470800
2,42	1,15681002	0,92250641
2,44	1,16139873	0,92026929
2,46	1,16606381	0,91799691
2,48	1,17080487	0,91568960
2,50	1,17562146	0,91334769
2,52	1,18051309	0,91097154
2,54	1,18547921	0,90856154
2,56	1,19051926	0,90611811
2,58	1,19563259	0,90364167
2,60	1,20081855	0,90113270
2,62	1,20607642	0,89859167
2,64	1,21140544	0,89601908
2,66	1,21680484	0,89341548
2,68	1,22227376	0,89078140
2,70	1,22781134	0,88811743
2,72	1,23341667	0,88542414
2,74	1,23908881	0,88270216
2,76	1,24482677	0,87995211
2,78	1,25062954	0,87717465
2,80	1,25649608	0,87437043
2,82	1,26242530	0,87154015
2,84	1,26841610	0,86868449
2,86	1,27446734	0,86580419
2,88	1,28057787	0,86289996
2,90	1,28674650	0,85997254
2,92	1,29297201	0,85702270
2,94	1,29925318	0,85405119

Продовження додатка А

x_t	R_{nt}	L_{int}
2,96	1,30558876	0,85105880
2,98	1,31197747	0,84804631
3,00	1,31841804	0,84501451
3,02	1,32490916	0,84196421
3,04	1,33144952	0,83889622
3,06	1,33803780	0,83581135
3,08	1,34467265	0,83271043
3,10	1,35135274	0,82959427
3,12	1,35807672	0,82646371
3,16	1,37165092	0,82016270
3,18	1,37849843	0,81699391
3,20	1,38538440	0,81381404
3,22	1,39230748	0,81062392
3,24	1,39926631	0,80742436
3,26	1,40625955	0,80421621
3,28	1,41328586	0,80100026
3,30	1,42034390	0,79777735
3,32	1,42743235	0,79454827
3,34	1,43454989	0,79131383
3,36	1,44169523	0,78807483
3,38	1,44886708	0,78483204
3,40	1,45606417	0,78158624
3,42	1,46328523	0,77833821
3,44	1,47052902	0,77508871
3,46	1,47779434	0,77183847
3,48	1,48507996	0,76858824
3,50	1,49238470	0,76533874
3,52	1,49970741	0,76209068
3,54	1,50704694	0,75884477
3,56	1,51440217	0,75560168
3,58	1,52177201	0,75236210
3,60	1,52915538	0,74912668
3,62	1,53655123	0,74589606
3,64	1,54395855	0,74267088
3,66	1,55137633	0,73945175
3,68	1,55880360	0,73623926
3,70	1,56623941	0,73303401
3,72	1,57368286	0,72983656
3,74	1,58113304	0,72664747

x_t	R_{nt}	L_{int}
3,76	1,58858909	0,72346726
3,78	1,59605017	0,72029647
3,80	1,60351547	0,71713559
3,82	1,61098422	0,71398511
3,84	1,61845565	0,71084551
3,86	1,62592904	0,70771723
3,88	1,63340369	0,70460072
3,90	1,64087892	0,70149640
3,92	1,64835409	0,69840467
3,94	1,65582859	0,69532593
3,96	1,66330181	0,69226054
3,98	1,67077321	0,68920887
4,00	1,67824223	0,68617126
4,02	1,68570837	0,68314803
4,04	1,69317144	0,68013950
4,06	1,70063008	0,67714595
4,08	1,70808476	0,67416767
4,10	1,71553476	0,67120492
4,12	1,72297970	0,66825796
4,14	1,73041921	0,66532701
4,16	1,73785295	0,66241230
4,18	1,74528061	0,65951404
4,20	1,75270190	0,65663243
4,22	1,76011653	0,65376763
4,24	1,76752426	0,65091982
4,26	1,77492485	0,64808915
4,28	1,78231810	0,64527576
4,30	1,78970381	0,64247978
4,32	1,79708181	0,63970133
4,34	1,80445195	0,63694052
4,36	1,81181409	0,63419743
4,38	1,81916811	0,63147215
4,40	1,82651390	0,62876476
4,42	1,83385139	0,62607531
4,44	1,84118049	0,62340385
4,46	1,84850116	0,62075043
4,48	1,85581336	0,61811507
4,50	1,86311704	0,61549781
4,52	1,87041221	0,61289866

Продовження додатка А

x_t	R_{nt}	L_{int}
4,54	1,87769885	0,61031761
4,56	1,88497698	0,60775467
4,58	1,89224662	0,60520983
4,60	1,89950781	0,60268306
4,62	1,90676057	0,60017435
4,64	1,91400497	0,59768366
4,66	1,92124107	0,59521094
4,68	1,92846894	0,59275616
4,70	1,93568866	0,59031926
4,72	1,94290032	0,58790017
4,74	1,95010401	0,58549885
4,76	1,95729983	0,58311521
4,78	1,96448789	0,58074919
4,80	1,97166830	0,57840070
4,82	1,97884119	0,57606966
4,84	1,98600667	0,57375598
4,86	1,99316489	0,57145957
4,88	2,00031596	0,56918032
4,90	2,00746004	0,56691815
4,92	2,01459725	0,56467295
4,94	2,02172776	0,56244460
4,96	2,02885169	0,56023300
4,98	2,03596921	0,55803804
5,00	2,04308046	0,55585960
5,02	2,05018560	0,55369756
5,04	2,05728478	0,55155180
5,06	2,06437817	0,54942221
5,08	2,07146591	0,54730864
5,10	2,07146591	0,54521099
5,12	2,08562511	0,54312911
5,14	2,09269688	0,54106289
5,16	2,09976365	0,53901218
5,18	2,10682557	0,53697687
5,20	2,11388280	0,53495681
5,22	2,12093550	0,53295188
5,24	2,12798383	0,53096193
5,26	2,13502794	0,52898684
5,28	2,14206800	0,52702646

x_t	R_{nt}	L_{int}
5,30	2,14910414	0,52508067
5,32	2,15613652	0,52314932
5,34	2,16316530	0,52123228
5,36	2,17019062	0,51932942
5,38	2,17721263	0,51744059
5,40	2,18423147	0,51556566
5,42	2,19124729	0,51370450
5,44	2,19826023	0,51185697
5,46	2,20527042	0,51002294
5,48	2,21227800	0,50820226
5,50	2,21928310	0,50639480
5,52	2,22628585	0,50460044
5,54	2,23328639	0,50281904
5,56	2,24028483	0,50105046
5,58	2,24728130	0,49929457
5,60	2,25427592	0,49755124
5,62	2,26126880	0,49582035
5,64	2,26826006	0,49410176
5,66	2,27524982	0,49239535
5,68	2,28223817	0,49070098
5,70	2,28922522	0,48901853
5,72	2,29621109	0,48734788
5,74	2,30319586	0,48568890
5,76	2,31017963	0,48404147
5,78	2,31716250	0,48240547
5,80	2,32414456	0,48078077
5,82	2,33112590	0,47916726
5,84	2,33810659	0,47756481
5,86	2,34508674	0,47597331
5,88	2,35206640	0,47439265
5,90	2,35904566	0,47282271
5,92	2,36602460	0,47126337
5,94	2,37300328	0,46971453
5,96	2,37998177	0,46817607
5,98	2,38696015	0,46664788
6,00	2,39393846	0,46512986
6,02	2,40091678	0,46362189
6,04	2,40789516	0,46212387

Продовження додатка А

x_t	R_{nt}	L_{int}
6,06	2,41487365	0,46063570
6,08	2,42185231	0,45915728
6,10	2,42883118	0,54768849
6,12	2,43581033	0,45622925
6,14	2,44278978	0,45477945
6,16	2,44976959	0,45333899
6,18	2,45674980	0,45190778
6,20	2,46373044	0,45048572
6,22	2,47071155	0,44907271
6,24	2,47769317	0,44766867
6,26	2,48467532	0,44627350
6,28	2,49165805	0,44488711
6,30	2,49864137	0,44350941
6,32	2,50562531	0,44214032
6,34	2,51260990	0,44077974
6,36	2,51959516	0,43942759
6,38	2,52658112	0,43808379
6,40	2,53356779	0,43674826
6,42	2,54055518	0,43542090
6,44	2,54754333	0,43410164
6,46	2,55453223	0,43279041
6,48	2,56152191	0,43148711
6,50	2,56851237	0,43019168
6,52	2,57550363	0,42890403
6,54	2,58249569	0,42762410
6,56	2,58948857	0,42635180
6,58	2,59648226	0,42508707
6,60	2,60347679	0,42382983
6,62	2,61047214	0,42258000
6,64	2,61746832	0,42133753
6,66	2,62446534	0,42010234
6,68	2,63146319	0,41887436
6,70	2,63846189	0,41765352
6,72	2,64546141	0,41643976
6,74	2,65246177	0,41523302
6,76	2,65946297	0,41403322
6,78	2,66646499	0,41284031
6,80	2,67346783	0,41165422
6,82	2,68047150	0,41047489

x_t	R_{nt}	L_{int}
6,84	2,68747598	0,40930226
6,86	2,69448127	0,40813627
6,88	2,70148737	0,40697685
6,90	2,70849426	0,40582396
6,92	2,71550194	0,40467753
6,94	2,72251040	0,40353750
6,96	2,72951963	0,40240383
6,98	2,73652962	0,40127645
7,00	2,74354037	0,40015531
7,02	2,75055186	0,39904036
7,04	2,75756409	0,39793154
7,06	2,76457705	0,39682880
7,08	2,77159072	0,39573209
7,10	2,77860509	0,39464135
7,12	2,78562015	0,39355655
7,14	2,79263590	0,39247762
7,16	2,79965232	0,39140452
7,18	2,80666939	0,39033720
7,20	2,81368712	0,38927561
7,22	2,82070548	0,38821970
7,24	2,82772446	0,38716944
7,26	2,83474406	0,38612476
7,28	2,84176426	0,38508563
7,30	2,84878505	0,38405201
7,32	2,85580641	0,38302384
7,34	2,86282864	0,38200108
7,36	2,86985083	0,38098370
7,38	2,87687386	0,37997114
7,40	2,88389741	0,37896487
7,42	2,89092149	0,37796334
7,44	2,89794607	0,37696701
7,46	2,90497115	0,37597585
7,48	2,91199671	0,37498981
7,50	2,91902275	0,37400885
7,52	2,92604925	0,37303293
7,54	2,93307620	0,37206201
7,56	2,94010359	0,37109607
7,58	2,94713140	0,37013504
7,60	2,95415964	0,36917891

Продовження додатка А

x_l	R_{nt}	L_{int}
7,62	2,96118828	0,36822763
7,64	2,96821733	0,36728117
7,66	2,97524675	0,36633948
7,68	2,98227656	0,36540254
7,70	2,98930674	0,36447031
7,72	2,99633727	0,36354275
7,74	3,00336815	0,36261983
7,76	3,01039937	0,36170151
7,78	3,01743092	0,36078776
7,80	3,02446279	0,35987855
7,82	3,03149498	0,35897385
7,84	3,03852747	0,35807361
7,86	3,04556025	0,35717781
7,88	3,05259332	0,35628642
7,90	3,05962668	0,35539940
7,92	3,06666030	0,35451672
7,94	3,07369419	0,35363835
7,96	3,08072834	0,35276426
7,98	3,08776273	0,35189442
8,00	3,09479738	0,35102880
8,02	3,10183225	0,35016737
8,04	3,10886736	0,34931009
8,06	3,11590269	0,34845695
8,08	3,12293824	0,34760790
8,10	3,12997400	0,34676293
8,12	3,13700996	0,34592200
8,14	3,14404613	0,34508508
8,16	3,15108249	0,34425215
8,18	3,15811904	0,34342318
8,20	3,16515577	0,34259814
8,22	3,17219269	0,34177700

Навчальне видання

Методичні вказівки до практичних занять «Контактний метод визначення фізико-механічних параметрів для проектування обладнання технічних об'єктів» з дисципліни «Проектування технічних об'єктів та обладнання» для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізацій: «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» «Обладнання переробних і харчових виробництв» денної та заочної форм навчання

Укладачі:

СЕБКО Вадим Вадимович,

БАБЕНКО Володимир Миколайович,

БАРАНОВА Антоніна Олегівна

Відповідальний за випуск В.П. Шапорев

Роботу рекомендувала до видання Н.М. Самойленко

Редактор Л. А. Пустовойтова

План 2018 р., п.12

Підп. до друку __ 2018 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. RISO-друк.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 2,1. Обл. – вид. арк. 2,5. Наклад 50 прим.

Зам. № _____. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ»

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХПІ» 61002, Харків, вул. Кирпичова